

# Economic dan Emission dispatch pada Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali Menggunakan Composite Generation Cost Function dengan Metode Cuckoo Optimization Algorithm

Daya Juang Mahaputra, Rony Seto Wibowo, dan Ardyono Priyadi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: ronyseto@ee.its.ac.id, priyadi@ee.its.ac.id

**Abstrak**— Permintaan daya listrik yang terus bertambah menyebabkan daya listrik yang disuplai oleh pembangkit menjadi lebih besar. Kondisi beban yang harus disuplai pembangkit selalu berubah-ubah tiap waktunya, maka penyaluran energi listrik haruslah sesuai antara energi yang terbangkitkan oleh pembangkit dengan jumlah beban yang harus disuplai untuk memperoleh biaya pembangkitan yang paling ekonomis. Pada Tugas Akhir ini untuk mendapatkan biaya yang ekonomis akan dilakukan optimasi pembangkit sehingga didapatkan nilai pembangkitan yang paling optimal. Pengoptimalan pembangkit bertujuan untuk mendapatkan biaya operasional yang minimum tetapi tetap dapat memenuhi permintaan beban yang ada. Penggunaan generator dengan bahan bakar fosil dapat memberikan efek pencemaran lingkungan akibat emisi sisa dari pembakaran. Proses optimasi akan membuat jumlah bahan bakar yang digunakan dapat diminimalisir sehingga akan mengurangi emisi yang dihasilkan oleh pembangkit.

**Kata Kunci**—Cuckoo Search Algorithm, Composite Generation Cost Function, Economic Dispatch, Emisi.

## I. PENDAHULUAN

ENERGI listrik merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting bagi keberlangsungan hidup manusia. Sejak revolusi industri, kebutuhan energi listrik terus meningkat secara tajam. Seiring dengan meningkatnya jumlah populasi dan kesejahteraan manusia menyebabkan kebutuhan energi listrik terus meningkat juga. Permintaan daya listrik yang terus bertambah menyebabkan daya listrik yang disuplai oleh pembangkit menjadi lebih besar. Untuk memenuhi kebutuhan energi manusia dibutuhkan kapasitas pembangkit yang terus meningkat sehingga mengharuskan menggunakan pembangkit lebih dari satu unit pembangkit yang beroperasi. Jumlah beban yang harus disuplai pembangkit selalu berubah-ubah tiap waktu nya. Oleh karena itu, penyaluran energi listrik haruslah sesuai antara energi yang terbangkitkan oleh pembangkit dengan jumlah beban yang harus disuplai untuk memperoleh biaya pembangkitan yang paling ekonomis. Untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis, diperlukan suatu mekanisme pembagian pembebanan pada pembangkitan yang biasa disebut dengan Economic Dispatch (ED).

Economic dispatch (ED) merupakan hal penting dalam

kontrol dan operasi pada sistem tenaga. Fungsi utama dari ED adalah untuk menjadwalkan pembangkitan dari setiap pembangkit yang beroperasi untuk dapat memenuhi kebutuhan beban pada biaya pembangkitan paling minimal. Untuk mempertahankan life time dari pembangkit dan peralatan pendukung pembangkit, thermal gradient dipertahankan pada batasan aman. Parameter mekanis tersebut diterjemahkan sebagai batas dari laju perubahan daya output atau biasa disebut ramp rate. ED konvensional hanya dapat digunakan untuk satu level beban.

Pembangkit yang ada di pulau Jawa dan Bali kebanyakannya merupakan pembangkit thermal yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama pembangkitan. Batu bara merupakan energi yang tidak terbarukan dan seiring berjalannya waktu, lama kelamaan jumlah batu bara akan habis. Selain itu, batu bara yang digunakan untuk pembangkit di Jawa dan Bali dikirim dari luar pulau Jawa sehingga harga batu bara juga dipengaruhi oleh harga minyak dunia. Oleh karena itu, perlu dilakukan penghematan dengan cara menentukan pembebanan optimal pada setiap pembangkit.

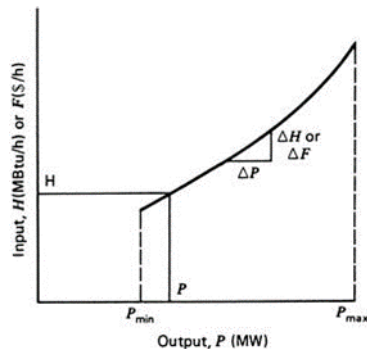
## II. SISTEM TENAGA LISTRIK

### A. Sistem Pembangkitan

Generator yang biasa digunakan pada sistem tenaga listrik yaitu generator tiga fasa atau generator sinkron. Generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan prinsip induksi elektromagnet [1] bekerja berdasarkan hukum faraday yakni apabila suatu konduktor bergerak pada sebuah medan magnet dan memotong garis gaya magnet maka pada ujung penghantar tersebut akan timbulkan ggl (garis gaya listrik). Energi mekanik dapat berasal dari turbin hidrolik pada air terjun, turbin uap, turbin angin, dan lain sebagainya. Pada sistem tenaga, beberapa generator dioperasikan paralel untuk menyuplai beban [2]. Generator pada sistem terkoneksi pada titik titik tertentu yang disebut dengan bus.bertemu di suatu titik pada ketinggian tertentu.

Karakteristik unit pembangkit meliputi karakteristik input-output pembangkit, karakteristik heatrate, dan karakteristik incremental cost rate, karakteristik ini berkaitan dengan biaya

pembangkitan dari unit pembangkit untuk mencapai nilai yang optimum. Input dari unit pembangkit berupa bahan bakar yang dinyatakan dalam konsumsi energy (Mbtu/h) atau pembelian bahan bakar (\$/h). Incremental rate menyatakan hubungan perubahan dari pembangkitan yang dihasilkan dengan konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan.



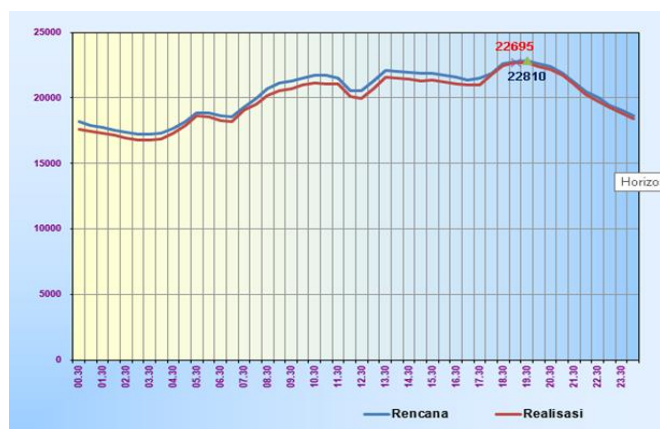
Gambar 1. Kurva Karakteristik Input-Output Unit Pembangkit

### B. Sistem Transmisi

Tujuan dari sistem transmisi yaitu untuk mentransfer energi listrik dari unit unit pembangkit menuju sistem distribusi yang menyuplai beban [2]. Pada sistem tenaga listrik, saluran transmisi akan mengakibatkan losses pada sistem sehingga total tegangan yang dibangkitkan oleh generator harus lebih tinggi dari total beban. Losses pada sistem ini direpresentasikan sebagai matriks B.

### C. Sistem Pembebanan

Beban pada sistem tenaga dibagi menjadi beberapa kawasan yaitu kawasan industri, komersial, dan residensial. Berdasarkan karakteristik beban pada masing masing kawasan, kebutuhan daya listrik selalu berubah ubah dalam satuan waktu.



Gambar 2. Profil Beban Harian [3]

Pada kurva beban harian, dapat disimpulkan beban pada malam hari cenderung lebih tinggi dibandingkan beban pada siang hari. Permintaan daya minimal yang berlangsung sepanjang hari disebut dengan beban dasar. Sedangkan permintaan daya maksimum yang hanya berlangsung beberapa jam disebut dengan beban puncak. Beban antara beban dasar dan beban puncak disebut beban menengah [2,4].

## III. COMPOSITE GENERATION COST FUNCTION

Sebuah teknik yang berguna untuk memudahkan prosedur suplai bahan bakar adalah dengan membuat kurva komposit biaya produksi generator. Prosedur sederhana yang dapat dilakukan untuk mendapatkan  $F_s(P_s)$  adalah dengan melakukan iterasi lambda secara bertahap dari  $\lambda_{min}$  hingga  $\lambda_{max}$ , dimana

$$\lambda^{min} = \min\left(\frac{dF_i}{dP_i}, i = 1 \dots N\right)$$

$$\lambda^{max} = \max\left(\frac{dF_i}{dP_i}, i = 1 \dots N\right)$$

Pada setiap iterasi hitung nilai total biaya dan total daya yang dibangkitkan oleh semua unit. Hal itu akan merepresentasikan setiap titik untuk membentuk kurva  $F_s(P_s)$

## IV. ECONOMIC DAN EMISSION DISPATCH

### A. Emission Dispatch

Pada setiap operasi sistem tenaga listrik ada dua hal yang perlu diperhatikan yaitu, biaya pembangkitan dan emisi gas buang dari masing masing unit pembangkit. Beberapa pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil akan menghasilkan emisi dari sisa pembakaran. Emisi tersebut dapat berupa Sulfur Dioksida ( $SO_2$ ), Karbon Dioksida ( $CO_2$ ), dan Nitrogen Oksida ( $NO_x$ ).

$$E(P) = \sum_{i=1}^N 10^{-2} (\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2) + \zeta_i \exp(\lambda_i P_i)$$

Dimana  $E(P)$  adalah total emisi generator dalam g dan  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $\zeta_i$ , dan  $\lambda_i$  adalah koefisien non-negatif dari karakteristik emisi generator unit-i.

### B. Economic Dispatch

Economic dispatch merupakan salah satu masalah yang harus diselesaikan dalam operasi system tenaga listrik. Economic dispatch didefinisikan sebagai proses pengalokasian daya pembangkitan kepada generator sehingga sistem pada beban dapat disuplai secara ekonomis [5]. Tujuan utama dari economic dispatch adalah bagaimana mengoperasikan sistem tenaga untuk menyuplai semua beban dengan biaya minimum dan dapat memenuhi permintaan beban dengan biaya operasi sekecil mungkin. Terdapat berbagai macam metode untuk

menyelesaikan permasalahan economic dispatch, mulai dari metode sederhana sederhana seperti iterasi lamda, base point, participation factors dan metode gradient hingga menggunakan firefly algorithm, Artificial bee colony (ABC), dan Particle swarm optimization algorithm (PSO) [6].

$$F_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i)$$

Dimana  $F_T$  adalah total biaya dalam R/h,  $i$  merupakan jumlah dari generator,  $P_i$  adalah daya generator ke  $i$  yang dinyatakan dalam MW. Sementara  $F_i(P_i)$  merupakan biaya pembangkitan untuk  $P_i$ .

### C. Constraints

Terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan saat melakukan economic dispatch, salah satunya adalah permintaan beban (load). Total daya yang dibangkitkan oleh suatu generator harus sama dengan permintaan beban ditambah losses.

$$P_D + P_L - \sum_{i=1}^n F_i(P_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n F_i(P_i) = P_D + P_L$$

Dimana  $P_D$  merupakan total permintaan beban dan  $P_L$  adalah losses pada saluran transmisi.

Daya yang dibangkitkan oleh generator harus berada diantara ratingnya ( $P_{min}$  dan  $P_{max}$ ). Batasan pada setiap generator dapat dituliskan:

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max}$$

Dimana  $P_{i,min}$  adalah daya output minimum dari generator  $i$  dan  $P_{i,max}$  merupakan daya output maksimum dari generator  $i$ .

## V. PENERAPAN CUCKOO SEARCH ALGORITHM

Cuckoo search algorithm merupakan metode berbasis populasi yang sama dengan metode meta-heuristik lainnya. Struktur dari algoritma ini terdiri dari dua operasi utama yaitu pencarian langsung yang didasari levy flight dan pencarian acak yang didasari oleh probabilitas induk burung lain menemukan telur asing di sarangnya. Dengan kombinasi dari dua operasi, algoritma cuckoo search menjadi metode pencarian yang lebih baik dibandingkan metode meta-heuristik lainnya.

Pada cuckoo search, setiap sarang merepresentasikan solusi dan populasi dari sarang digunakan untuk mencari solusi terbaik dari permasalahan. Langkah-langkah dasar dari metode cuckoo search ini dijelaskan sebagai berikut :

Berdasarkan data SPP maka dapat dihitung sudut perlindungan sebagai berikut.

### Step 1 : Inisialisasi

Populasi dari  $N_p$  sarang burung lain direpresentasikan oleh  $X = [X_1, X_2, \dots, X_{N_p}]^T$  dimana setiap sarang  $X_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ij}, \dots, P_{iW}]$

Merepresentasikan daya keluaran setiap unit. Daya keluaran setiap unit diinisialisasi oleh  $P_j^{min} + rand_1 * (P_j^{max} - P_j^{min})$  dimana  $rand_1$  merupakan distribusi acak antara 0 dan 1.

### Step 2 : Pencarian sarang

Pada proses pencarian sarang, sejumlah sarang dari burung cuckoo yang ada akan dipilih secara random, dimana sarang yang terpilih tidak boleh sarang yang terbaik, hal ini disebabkan karena sarang yang terbaik akan digunakan dalam proses perhitungan. Pada sarang yang terpilih ini kemudian akan dilakukan perhitungan terhadap matriks fuzzy yang terdapat di dalamnya. Proses perhitungan dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$A1 = A + stepsize$$

dimana  $A$  menyatakan matriks fuzzy lama untuk sarang yang terpilih,  $A1$  menyatakan matriks fuzzy baru untuk sarang yang terpilih dan  $stepsize$  menyatakan besar randomstep yang menggunakan formula sebagai berikut:

$$stepsize = 0.01 * step * (s - best)$$

dimana 0.01 menyatakan hasil perhitungan Lévy Flights dengan algoritma mantegna.  $s$  menyatakan matriks fuzzy lama untuk sarang yang terpilih dan  $best$  menyatakan matriks fuzzy dari sarang yang terbaik. Untuk proses perhitungan lévy flights dengan algoritma mantegna dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Dilakukan perhitungan terhadap besar langkah  $step$  menggunakan rumus :

$$step = \frac{u}{|v|^{1/\beta}}$$

Dimana  $u$  dan  $v$  merupakan nilai yang diambil dari distribusi normal.

2. Masukkan nilai  $\sigma_u = \left\{ \frac{\tau(1+\beta) \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\tau|\frac{1+\beta}{2}| \beta \cdot 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right\}^{1/\beta}$  dan  $\sigma_v = 1$

Dimana  $\tau$  menyatakan fungsi distribusi gamma (menggunakan fungsi dari library matematika bawaan) dan  $\beta$  menyatakan nilai konstanta perhitungan, dalam hal ini nilai yang digunakan adalah 3/2

### Step 3 : Kemungkinan penemuan telur asing

Sebuah tindakan penemuan telur asing di sarang tuan rumah dengan probabilitas  $P_a$  juga menciptakan sebuah solusi baru untuk permasalahan serupa untuk *levy flight*. Solusi baru karena penemuan telur asing dapat dilakukan dengan cara :

$$X_i^{dis} = X_{best_i} + K \times \Delta X_i^{dis}$$

Dimana  $K$  merupakan koefisien baru yang ditentukan berdasarkan probabilitas burung lain menemukan telur asing pada sarangnya :

$$K = \begin{cases} 1 & \text{if } rand_2 < p_a \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

## VI. SIMULASI DAN ANALISIS

### A. Hasil Composite Generation Cost Function

Tabel 1 merupakan persamaan baru untuk masing-masing bus pada sistem 500kV Jawa-Bali. Tabel 2 merupakan persamaan untuk pembangkit hidro pada sistem 500kV Jawa-Bali. Persamaan tersebut nantinya akan digunakan untuk melakukan economic dispatch. Sementara Tabel 3 merupakan persamaan emisi untuk masing-masing pembangkit yang nantinya akan digunakan untuk melakukan emission dispatch.

Tabel 1.  
Persamaan Biaya Pembangkit Setelah Dikomposit

Pembangkit	x2	x1	x0	Pmin	Pmax
Suralaya	-9.16689	413479.4	40667795	1703	3247
Paiton	-49.9043	577947.3	-14774223	1954	2900
Muara Tawar	-696.988	3937191	-2.56E+09	1401	2955
Gresik	137.251	1254309.5	10961381	529	955
Tanjung Jati	3.37162	284810.3	55581457	1221	1979
Grati	1412.58	1018922	57269598	320	795.6

Tabel 2.  
Incremental Cost Rate PLTA

Pembangkit	x2	x1	x0	Pmin	Pmax
Cirata	0	12000	0	500	1000
Saguling	0	8000	0	350	700

Tabel 3.  
Nilai Persamaan Emisi Tiap Unit Pembangkit

Pembangkit	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	Pmin	Pmax
Suralaya	-0.1145	5164.84	507988.6	1703	3247
Paiton	-0.696	8060.68	-2060575.21	1954	2900
Muara Tawar	-1.595	9015.56	-5873535.42	1401	2955
Gresik	0.3877	3543.443	309660.6	529	955
Tanjung Jati	0.0418	3536.53	690164.34	1221	1979
Grati	8.0238	5787.71	3253048.75	320	795.6

### B. Economic dan Emission Dispatch

Tabel 4 merupakan hasil simulasi menggunakan metode optimasi *cuckoo search* yang berisi daya yang terbangkit oleh setiap unit pembangkit dan biaya masing-masing pembangkit. Sementara tabel 5 menunjukkan total daya yang dibangkitkan, biaya total yang diperlukan untuk memenuhi permintaan beban dan total emisi yang dihasilkan.

Tabel 4.  
Hasil Simulasi Economic Dispatch Menggunakan Cuckoo Search

Pembangkit	Daya (MW)	Cost (Rp/Jam)
Suralaya	2886.4689	1157787528
Paiton	2601.8766	1018165109
Muara Tawar	1569.1263	1896820959
Gresik	732.70698	1102339700
Tanjung Jati	1859.272	596776723.5
Grati	329.11998	1061054967
Cirata	827.19356	9926322.688
Saguling	557.63568	4461085.448

Tabel 5.  
Total Daya, Biaya dan Emisi

Daya (MW)	Cost (Rp/Jam)	Emisi (gram/Jam)
11363.4	6847332395	52241497.24

Dari hasil simulasi didapatkan nilai daya yang akan dibangkitkan oleh setiap generator untuk memenuhi permintaan beban, dimana daya yang akan dibangkitkan oleh setiap unit berbeda beda. Untuk permintaan beban sebesar 11363.4 MW, unit Suralaya harus menyuplai daya sebesar 2886.46 MW, unit Paiton sebesar 2601.87 MW, unit Muara Tawar sebesar 1569.12 MW, unit Gresik sebesar 732.7 MW, unit Tanjung Jati sebesar 1859.27 MW dan unit Grati 329.11 MW. Sementara untuk pembangkit hidro, unit Cirata membangkitkan daya sebesar 827.19 MW dan unit Saguling sebesar 557.63 MW. Nilai tersebut sudah sesuai dengan batasan daya minimum dan maksimum pada masing-masing pembangkit. Biaya total yang diperlukan pembangkit berdasarkan simulasi menggunakan metode *cuckoo search* sebesar 6,847,332,395 Rp/jam. Sedangkan total emisi dari hasil pembakaran adalah 52,241,497.24 gram/jam.

### C. Validasi Data

*Quadratic Programming* akan digunakan sebagai metode pembandingan dari hasil simulasi yang didapat. *Quadratic programming* merupakan metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi dengan fungsi objektif berupa persamaan kuadrat dan batasan batasan linear.

Tabel 6.  
Perbandingan Hasil Quadratic Programming dan Cuckoo Search Untuk Permasalahan Economic Dispatch

Quadratic Programming	Cuckoo Search
10749972892	11299382723

Tabel 7.  
Persamaan Biaya Pembangkit Setelah Dikomposit

Quadratic Programming	Cuckoo Search
70819523.41	72668689.93

Dari tabel 6 dan 7 terlihat perbandingan antara *quadratic programming* dan *cuckoo search* untuk permasalahan *economic* dan *emission dispatch*. Terdapat sedikit perbedaan

nilai dari kedua metode tersebut sehingga metode yang digunakan pada tugas akhir ini dapat diterapkan untuk permasalahan *economic* dan *emission dispatch*

#### D. Analisis Statistik Fitness

Tabel 8.  
Persamaan Biaya Pembangkit Setelah Dikomposit

Tes	Fitness
1	6.8
2	6.85
3	6.96
4	6.85
5	6.78
6	6.92
7	7
8	6.73
9	6.69
10	6.93
<b>Min</b>	6.73
<b>Max</b>	7
<b>Mean</b>	6.85
<b>SDV</b>	0.1018113

Tabel 8 menunjukkan nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan standar deviasi dari *fitness*. Nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan nilai-nilai pada tabel berkumpul disekitar rata-rata hitungannya (penyebarannya kecil).

## VII. PENUTUP

### A. Kesimpulan

Dari simulasi yang diperoleh didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Algoritma CSA dapat digunakan untuk melakukan *economic* maupun *emission dispatch*.
2. Pengkompositan persamaan generator akan mempermudah proses optimasi.
3. Pemaksimalan pengoperasian unit pembangkit dipengaruhi biaya operasi tiap unit pembangkit yang berbeda beda.
4. Total biaya yang diperlukan untuk memenuhi permintaan beban adalah sebesar 6,847,332,395 Rp/jam
5. Total emisi yang dihasilkan oleh pembangkit adalah sebesar 52,241,497.24 gram/jam
6. Hasil analisis statistic menunjukkan nilai penyebaran fitness kecil.

### B. Saran

Dari studi yang telah dilakukan diperoleh beberapa rekomendasi, yaitu:

1. Kasus yang digunakan dapat dikembangkan.
2. Losses pada saluran transmisi dapat diperhitungkan
3. Pengoptimasian *economic* dan *emission dispatch* dapat menambahkan batasan lain.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapman, Stephen J., "Electric Machinery Fundamentals", McGraw-Hill, 2005.
- [2] Saadat, Hadi, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999.
- [3] PT. PLN (Persero) P3B APB Gandul
- [4] Marsudi, Djiteng, "Operasi Sistem Tenaga Listrik", Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006.
- [5] Chowdhury, B.H. dan Rahman, Saifur, "A Review of Recent Advances in Economic Dispatch," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [6] K., Thenmalar dan Allirani, A., "Solution of Firefly Algorithm for the Economic Thermal Power Dispatch with Emission Constraint in Various Generation Plants," Tiruchengode, India, July 4 - 6, 2013.